

目錄

目錄.....	I
中文摘要.....	II
English Abstract.....	III
1. 計畫緣由與目的.....	1
2. OFDM 光封包交換都會環型網路架構.....	2
2.1、OFDMA/WDM 都會環狀網路架構.....	2
2.2、無線 RF 訊號與 OFDMA 資料訊號疊合技術.....	3
2.3、40 Gb/s OFDMA 都會環狀網路傳輸技術.....	5
3. 多重存取控制技術.....	8
3.1、OFDMA/WDM 都會環狀網路架構.....	9
3.2、多重存取控制系統.....	9
3.3、模擬程式結果.....	10
4. 自我評量.....	13
參考文獻.....	14

中文摘要

隨著大容量寬頻固定式擷取網路與無線行動式擷取網路之出現，以及網際網路高頻寬需求與支援語音、視訊、數據、行動性之Quad-play服務需求日漸成長，未來趨勢將朝向全光網路科技，同時光纖傳輸無線電頻訊號(radio over fiber)技術已經引起廣大的興致。為了執行下世代無線通訊系統，正交分頻多工系統(OFDM)在現有主要多工技術上，被認為是最佳技術。現在除了促進全光分波多工技術(WDM)之發展外，在下一代全光網路Layer-1設計與實現，混合型OFDM/WDM亦成為future-proof之技術。

在這期末報告中，我們首先提出新式全光都會環狀網路架構，根基於正交分頻多重存取技術，能夠無縫式整合高速寬頻資料傳輸以及多重天線存取之無線訊號。實驗結果顯示OFDMA-Ring允許來自三個遠端天線之20 MHz無線RF通道，在2.1 GHz頻道可以與4 GHz OFDMA-Ring訊號疊加在單一光波長之上。接著我們改進此OFDM光網路架構以支援更高頻寬傳輸與無線電頻訊號，其可以有效節省成本達到40 Gb/s資料傳輸率，僅利用10 GHz頻寬之EAM與DML即可。最後，我們提出了適用於此OFDMA/WDM環網架構之多重存取控制系統來管理各節點之頻寬存取。此系統藉由自我建構類神經推論網路來實現，可以動態性與公平性的即時性進行頻寬分配。網路模擬程式結果展示了其具有高網路輸出與公平分配頻寬之性能。

關鍵詞：正交分頻多工(OFDM)、正交分頻多重存取(OFDMA)、分波多工(WDM)、都會網路(MAN)、全光線路交換(OCS)、全光叢集交換(OBS)、全光封包交換(OPS)、服務品質保證(QoS)、媒介存取控制(MAC)、頻寬分配、四合一整合型服務。

English Abstract

With the emergence of both high capacity broadband fixed and mobile wireless access networks, and the ever-growing demand for high Internet bandwidth and support of quad-play (i.e., video, voice, data, and wireless), the future trend toward optical networking and optical transport of radio frequency signals, referred to radio over fiber, has attracted great interest. For implementing the next-generation wireless communication systems, OFDM systems have been considered the most promising technology among prevailing candidates. Such fact, in addition to recent advances in optical Wavelength Division Multiplexing (WDM) technologies, makes hybrid OFDM/WDM a future-proof underlying Layer-1 technology for the design and implementation of next-generation optical networks.

In this final report, we first propose a novel optical metro ring architecture based on orthogonal frequency division multiple access (OFDMA), that enables seamless integration of high-speed broadband transport and wireless signals from multiple remote antennas. Experimental results demonstrate that the OFDMA-Ring allows three 20 MHz wireless RF channels at 2.1 GHz band respectively from three remote antenna ports to be overlaid with 4 GHz OFDMA-Ring signal via one single wavelength. In addition, we improve the architecture of the OFDM optical ring network to support high data rate and RoF. Experimental results demonstrate that, by adopting adaptive modulation format, it cost-effectively achieves 40 Gb/s data rate using 10-GHz-bandwidth EAM and DML. Finally, we present a multiple access control (MAC) system for governing the bandwidth access on the OFDMA/WDM network. The MAC system is implemented by the self-constructing neural inference network (SONFIN), enabling dynamic and fair bandwidth allocation in real time. Simulation results demonstrate the MAC system enables high-throughput and fair bandwidth allocation.

Keywords: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), Wavelength Division Multiplexing (WDM), Metropolitan Area Network (MAN), Optical Circuit Switching (OCS), Optical Burst Switching (OBS), Optical Packet Switching (OPS), Quality-of-Service (QoS), Medium Access Control (MAC), Bandwidth Allocation, Quad-Play.

1. 計畫緣由與目的

隨著網際網路頻寬需求的快速成長，骨幹網路朝向以光纖為媒介傳送資訊。全光網路得以盛行，主要來自分波多工技術 (Wavelength Division Multiplexing; WDM) [1]之成熟，使傳輸速度與頻寬都大幅提升，以目前發展趨勢，全光網路將完全取代傳統電網路。在全球化長途骨幹網路皆採用光纖傳遞之際，都會網路也開始轉往全光網路來進行設計，而使用者端之擷取網路，目前已朝向光纖到家 (Fiber to the Home)，以及光纖結合無線網路(Radio over Fiber)來發展。網際網路服務，則開始提出以Triple-play (Data、Voice、Video)結合Wireless，成為Quad-play 四合一多媒體整合型服務。

在長途光纖網路中，由於傳遞資訊已經過路由器進行訊務匯集統合，對頻寬需求呈現較為穩定之狀態，以固定的WDM通道並使用全光線路交換(Optical Circuit Switching; OCS)的交換技術，每隔一段長時間再重新調整，即可滿足長途骨幹網路之應用服務需求。然而在都會網路部份，其身為長途骨幹網路與使用者端擷取網路之中繼站，需面對來自於擷取網路較高的動態訊務需求，其迅速變化的特性，使得全光都會網路需要全光封包交換(Optical Packet Switching; OPS) [2-4]技術進行頻寬共享，並配合網路節點之多功能媒介存取控制(Medium Access Control; MAC)機制，來提供有效率的頻寬分配與各類型等級的網路服務品質(Quality of Service; QoS)保證技術。

有關OPS的架構與相關的優缺點，在[5]有完整的比較與分析。而我們在過去幾年發展OPS技術上，採用了WDM結合分時多工(Time Division Multiplexing; TDM)的方式，將封包載入波長內之不同時段，以達到頻寬共享。隨著頻寬需求提高到10 Gbps之時，我們亦針對TDM/WDM架構進行效能提升。然而，TDM技術由於面對來自不同來源之資料，訊號強度強弱有別，對接收端而言需採用Burst Mode Receiver (BMR)才能進行接收動作，而以目前最先進之技術，10 Gbps BMR之穩定性仍受到環境限制，使得封包之間須存在夠大之guard time與preamble signal，而這導致效能受到極大影響。

因此，我們開始研究其他方案來解決此問題。而在無線網路上已採用多年的正交分頻多工(Orthogonal Frequency Division Multiplexing; OFDM)技術則開始探討應用於光網路之可能性[6,7,8]。OFDM技術將傳輸信號分割成了多個子載波進行傳輸，利用傅立葉轉換(FFT)技術，將訊號由時帶轉換至頻帶，至接收端再轉換回時帶並整合子載波為原訊號。然而其需進行大量計算，使得早期實際應用受到限制。而在近年來IC製程密度大幅提升，以及數位訊號處理器新架構提出，OFDM可即時計算結果，因此在通訊上的應用變為可行。OFDM主要的優勢在於，其具備高頻帶使用率，同時能有效抗拒多重路徑導致的訊號干擾現象，當運用於光纖訊號傳輸時，不僅可應付高頻寬需求，可以解決光色散所帶來的影響，

同時可以採用便宜且技術成熟之Continuous-mode receiver。而當無線網路與光纖網路進行結合時，由於無線電頻訊號已轉為OFDM訊號，因此不須經過解調過程，直接在光纖上傳輸無線電頻RF訊號已成為未來趨勢，也因此採用OFDM傳輸將能大幅提升使用彈性，便於達到Quad-play多媒體整合型服務。

因此本計畫之目的，為設計OFDMA/WDM之全光都會網路所需之技術。我們基於先前研究所得之各項經驗與技術，在第二章節提出新式的OFDM全光封包交換都會環型網路架構，能夠無縫式整合高速寬頻資料傳輸以及多重天線存取之無線訊號。接著在考量經濟效益狀況下，採用10 GHz頻寬之直調雷射(DML)與致電吸光調變技術(EAM)，達到40 Gb/s資料傳輸率。同時為了確保此技術可行性，我們建構都會網路實驗平台以進行實體驗證。在第三章節我們提出了適用於此OFDMA/WDM環網架構之多重存取控制系統來管理各節點之頻寬存取。此系統藉由自我建構類神經推論網路來實現，可以動態性與公平性的即時性進行頻寬分配。網路模擬程式結果展示了其具有高網路輸出與公平分配頻寬之性能。

2. OFDM 光封包交換都會環型網路架構

為了滿足加入無線訊號資料之Quad-play服務，首先我們著重在無線RF訊號與OFDMA訊號在傳輸時之整合能力。接著我們在有成本考量情況下，提出新式可傳輸40 GHz資料傳輸率之架構設計，並藉由雛形網路驗證可行性。在2.1章節，我們提出支援Quad-play之OFDM/WDM都會環狀網路架構與節點架構。在2.2章節，我們提出讓無線RF訊號與OFDMA資料訊號疊合傳送之技術。在2.3章節，利用較低速之10 GHz頻寬EAM與DML，我們提出可傳輸40 Gb/s之OFDMA光封包交換技術。為了驗證可行性，我們皆有設計實驗，透過OFDMA傳輸封包資料以及無線RF訊號。

2.1、OFDMA/WDM 都會環狀網路架構

OFDMA/WDM都會環狀網路是設計來支援Quad-play整合型服務，如圖一，都會環狀網路各節點可連通全光接取網路(如被動式光網路)以及無線接取網路(如WiMAX網路)。在光纖線上，利用WDM切分成數個波長通道進行傳輸，而每個波長通道則採用OFDM技術切分成數百個速率較低之子通道。數據、語音、視訊等資料以及無線RF訊號，則在子通道上進行傳送。在環網上的節點，可以連接全光接取網路、無線接取網路、或是長途骨幹網路。在傳輸數據、語音、視訊等資料時，會與網路上游解調後的資料，一起進行調變，再傳送至下游節點。由於無線網路目前主流已採用OFDM進行調變，因此在傳遞無線RF訊號時，不再重新解調，直接載入預先配置之子通道。

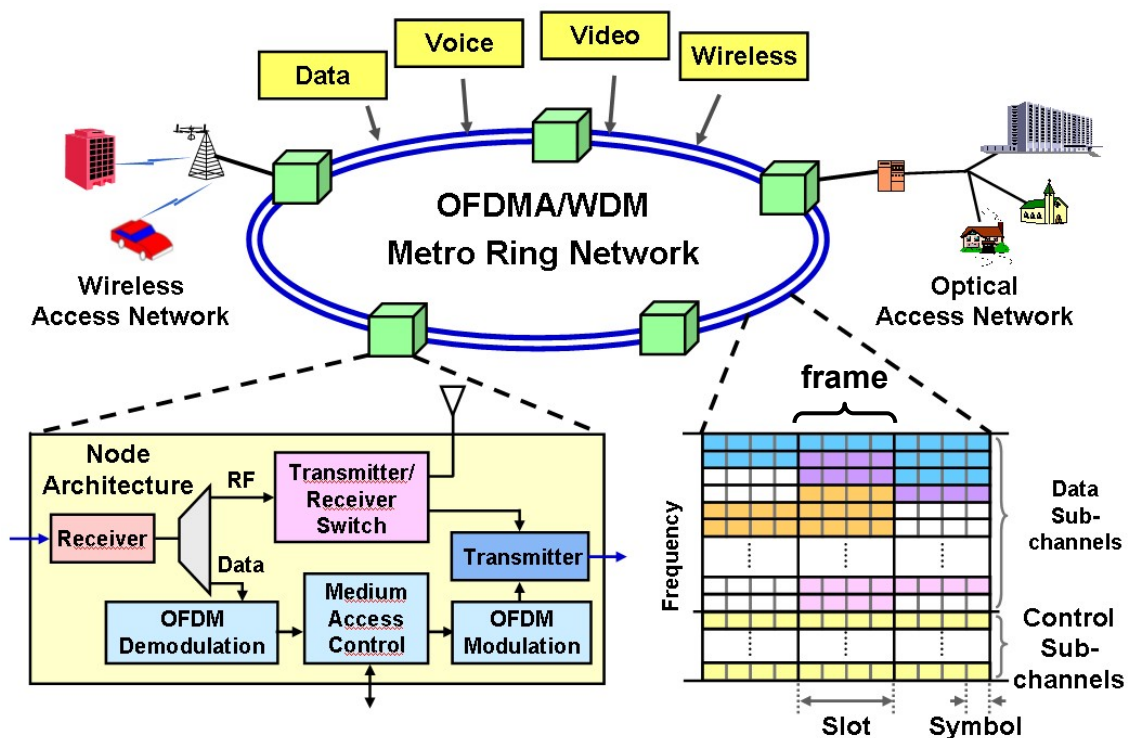
在節點架構內，來自環網上游節點之OFDM通道傳至此節點時，經由接收器轉成電訊號，透過解多工器將RF訊號與數據、影音、視訊等資料訊號分離，資

料訊號藉由OFDM解調之後得到原始封包資料，利用控制標頭先判斷封包目的地，若為此節點，則將其接收下來，並清空其所佔據之OFDMA位置。此節點若有封包需傳遞至下游節點，則觀察通道閒置區塊，並藉由媒介存取控制技術，決定其傳送時間，接著與上游節點其餘之封包一同進行OFDM調變，最後與無線RF訊號組合後一同傳送。RF訊號藉由獨立子通道傳輸，不需經過解調。在傳送接收交換器裡，配置給此天線之RF訊號子通道會藉由天線直接往外傳送，而天線接收之RF訊號，也會與其它子通道之RF訊號一同傳至下游節點。

2.2、無線 RF 訊號與 OFDMA 資料訊號疊合技術

OFDMA/WDM都會環狀網路架構設計，除了可傳送一般性的數據、語音、視訊之外，還必須支援多重無線訊號接收[9]。此無線訊號來自於不同區域之分散天線。我們利用圖二來說明兩個具有天線之節點，在接收無線RF訊號之後，疊加在原有OFDMA訊號的過程。首先，利用混合器、震盪器以及濾波器，將天線接收之無線訊號經過頻率偏移過程到預先配置的頻帶。此頻帶我們已預先安插零信號在對應的IFFT點上，以保持其頻帶乾淨。偏移的訊號接著與下傳的OFDMA訊號結合，藉由直接調頻雷射送至下一個節點。因為在此頻帶沒有子載波，因此無線訊號與下傳的OFDMA訊號不會發生干擾。

當下游節點收到上游節點來的光波時，先將接收訊號分成兩條路徑，第一條為下傳的OFDMA訊號，流程包含類比數位轉換器、OFDM解調、控制通道辨識、下載與上傳此節點之資料、產生OFDM調變訊號，並且進行數位類比轉換。在第



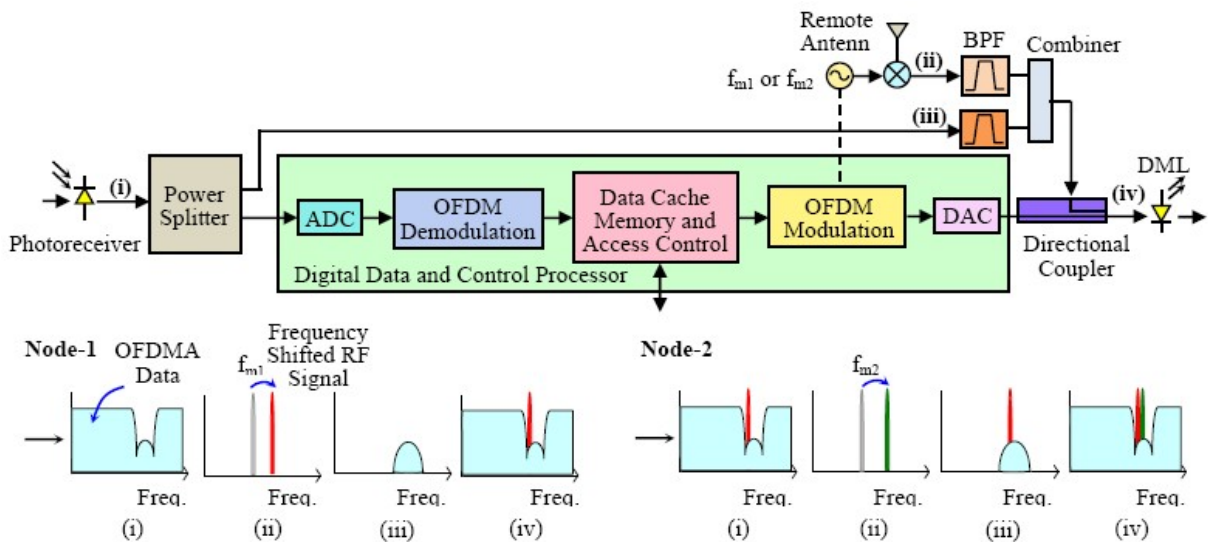
圖一、OFDMA/WDM都會環狀網路架構

二條路徑，系統在配置的無線波段使用通道濾波器，以移除OFDMA訊號並保留所有無線訊號。RF結合器將此節點所收到之RF訊號與上游節點之RF訊號合併。最後，系統將RF訊號與OFDMA訊號整合，並驅動雷射傳輸。

如圖二所示疊加示意圖，展示在入境節點與出節點時的OFDMA資料頻譜狀態。在Node 1時，位置(i)接收到上游OFDMA資料，其中保留一塊通道是給RF訊號傳輸用。位置(ii)將天線接收的RF訊號做頻率偏移 f_{m1} ，接著與位置(iii)經過濾波之後的訊號結合。RF訊號與OFDMA訊號在位置(iv)合併，並傳到下一個節點，此訊號不會與OFDMA訊號干擾。在Node 2時，依循相同的流程，天線訊號在位置(ii)會頻率偏移 f_{m2} ，並且與位置(iii)經過濾波之後的Node 1 RF訊號合併，到位置(iv)時，可傳輸OFDMA訊號以及兩根RF訊號。

我們藉由雛形實驗網路進行測試，將多重RF訊號與OFDMA訊號結合，以驗證此OFDMA環狀網路與系統架構可行性。如圖三，實驗網路測試包含四個節點，其中Node 1會產生OFDM訊號，並且Nodes 1, 2, and 3會產生無線RF訊號，而Node 4則會將訊號解回來。

實驗參數設定如下：Node 1在2.5 GHz頻寬產生16-QAM-OFDM訊號，並且在2100 MHz產生一個單一載波QPSK調變20 MHz symbol rate，並且驅動10 GHz頻寬直調雷射在波段1540 nm，其輸出能量為3 dBm。OFDM訊號是由10 GHz取樣率之任意波形產生器(AWG)產生，其FFT size為512，cyclic prefix為1/64。配置的RF頻帶在2130 MHz，為220 MHz寬，此寬度足夠容納多重無線訊號傳輸。合併的訊號頻譜也展示在圖三中。在Node 2與Node 3，訊號經過30 dB深度的Notch濾波器，模擬OFDM產生程序，RF結合器將原始在2100 MHz之RF訊號與頻率偏移之新的無線訊號疊合，其中Node 2之訊號偏移至2160 MHz，Node 3之訊號偏移至2200 MHz。最後，在Node 4，利用光學接收器將光訊號轉回電訊號，並且



圖二、無線 RF 訊號與 OFDMA 資料訊號疊加流程圖

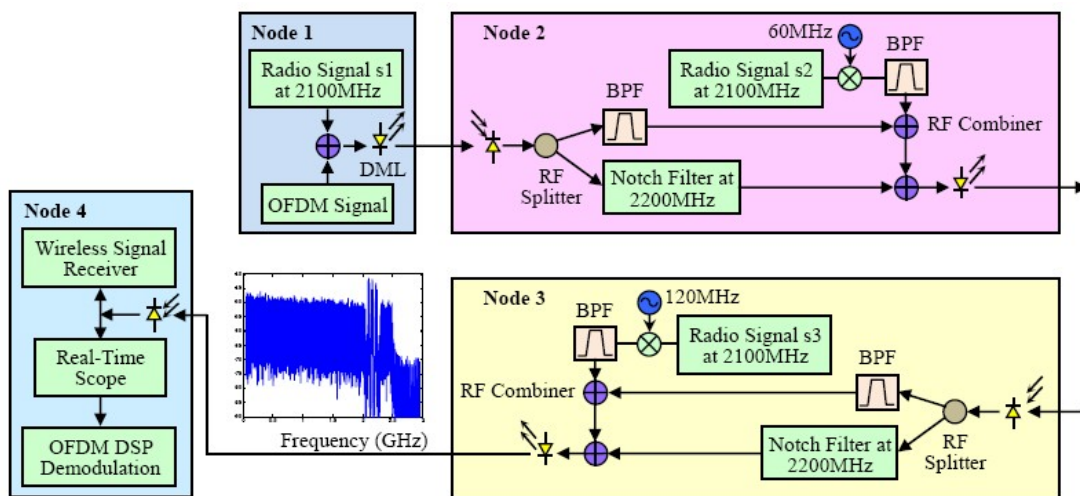
OFDM訊號與RF訊號利用訊號處理器解調回來。

在這個系統底下，為了達到最佳化傳輸表現與應付網路規模成長性，無線訊號與OFDMA訊號之能量分布成為決定性的系統參數。因為OFDMA訊號在每個節點皆先解調再重新調變，因此在節點之間的能量漏失情況顯得較為輕微，OFDMA訊號允許保持較低驅動能量，讓接收器可以正確回復資料。在整體調變指標為常數，且接收能量為-10 dBm設定下，圖四(a)展示出OFDMA與RF訊號在考量不同能量比率之訊號雜訊比(signal to noise ratio; SNR)曲線。

為了達到OFDMA訊號的高峰均功率比(peak-to-average ratio; PAPR)，隨著RF能量比例增加，且OFDMA訊號表現可接受範圍內，我們採用能量比例為1.5去最佳化RF訊號完整性，亦即RF訊號能量為OFDMA訊號的1.5倍。在最後節點的鏈結能量比例則設定為0.1。RF訊號SNR需求遠高於16 dB SNR無差錯要求的QPSK訊號格式。圖四(b)秀出Node 4的OFDM位元錯誤率，OFDMA訊號達到無差錯傳輸在-8.5 dBm在2 dB transmission penalty。最後，透過圖四(c)，在16-QAM OFDM訊號可偵測到一個乾淨的constellation圖，證明無線訊號與OFDMA訊號的結合性。

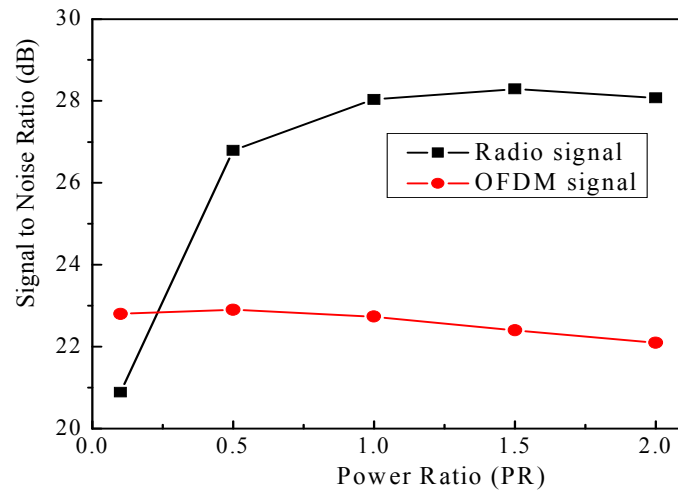
2.3、40 Gb/s OFDMA 都會環狀網路傳輸技術

為了增加資料傳輸率至40 Gb/s甚至更高速，高頻寬光都會環網採用Mach-Zender調變器(MZM)以避免光纖傳輸後之單邊帶[10]能量衰減。然而MZM設備相對而言較為昂貴，具有成本效益之其他方案為使用直調方式。如直調DFB雷射(DML)以及致電吸光調變技術(EAM)。若單純採用DML方式會有兩項阻礙。首先是DMLs產生雙帶寬光OFDM訊號而產生能量衰減。第二為DML正啞頻現象在傳輸超過常規最大傳輸距離時有較糟效應。因此我們展示在10-GHz DML與EAM元件下，達到40 Gb/s傳輸率。

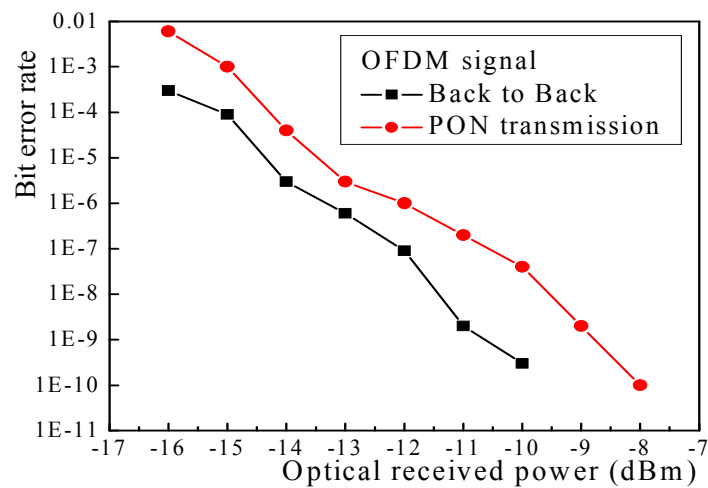


圖三、OFDMA 環狀雜形實驗網路設置

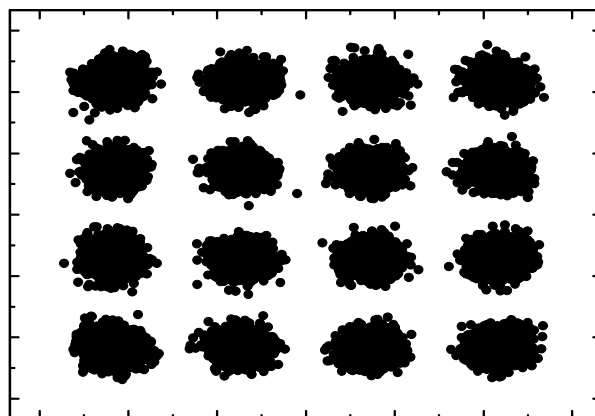
在實驗架構內，OFDM訊號由任意波形產生器(AWG，型號Tektronix® AWG7122)利用Matlab程式產生。OFDM傳輸器包含序列轉平行埠轉換器、QAM調變器、快速傅利葉逆轉換器、循環字首插入器、與數位類比訊號轉換器。AWG的取樣率與數位類比訊號解析力分別為12 GS/s與8位元。驅動訊號包含一個



(a) SNR performance



(b) BER of OFDMA signal



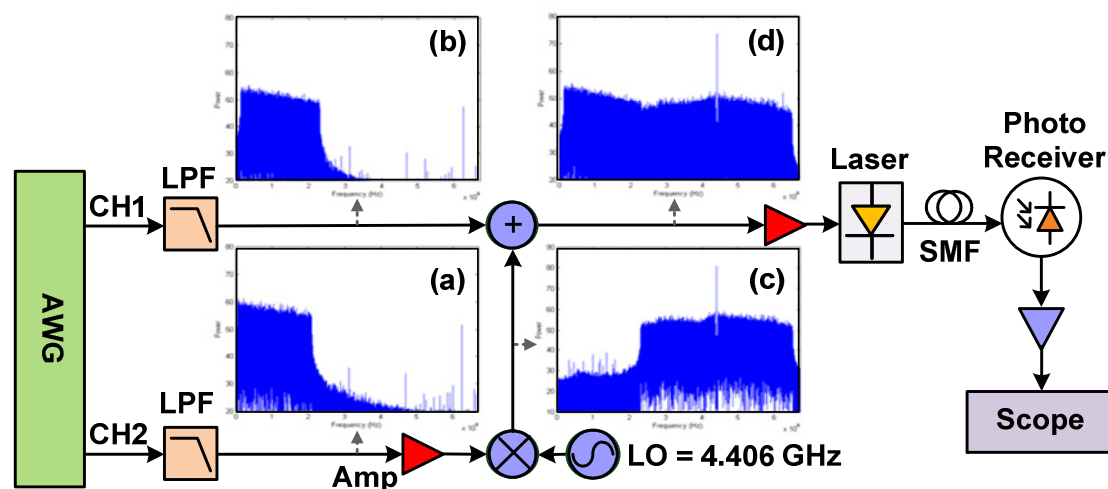
(c) Constellation diagram of OFDMA signal

圖四、維形網路實驗結果

23.4375-MSym/s 128-QAM符號之OFDM訊號，其編碼在6-98通道，頻寬為2.18 GHz。此為第一頻帶，資料傳輸率為15.2578 Gb/s。在第二頻帶由另一個OFDM訊號具備相同的符元率但是採用64-QAM格式編碼，並且向上轉換至4.406 GHz波段，其佔用99-186通道與200-287之合併資料率24.75 Gb/s。此兩OFDM頻帶合併，我們可以達到40 Gb/s資料傳輸率。

圖五展示了實驗設置並內置相應位置之電子頻譜展示。兩道電子訊號之資料流分別由AWG之通道一與通道二產生。將通道二訊號放大並且移頻至4.406 GHz。經過方向耦合器，兩組訊號接著合併，並且傳送至DFB或EAM。經由標準的單模光纖傳輸後，此光訊號由光感測器接收。經過平方律檢波器，放大其波形並由數位示波器(Tektronix® DPO 71254)擷取，其採樣率為50 GS/s以及3 dB頻寬為16 GHz。利用離線Matlab DSP程式作OFDM訊號解碼。由星座圖，我們量測訊號雜訊比並計算位元錯誤率。

由於RF訊號在光纖傳輸減弱會嚴重影響DML/EAM的之表現。為了克服這減弱的問題，我們採用了預加重演算法(Pre-emphasis algorithm)。在圖六，我們首先顯示訊號雜訊比於藍色曲線，此時未作功率調整。位於高頻率之子載波遭受到RF減弱影響造成嚴重的訊號雜訊比惡化。在採用預加重演算法後，我們觀察到一個較平順之訊號雜訊比曲線。圖七描繪出此EAM之每個子載波訊號雜訊比，分別為相鄰狀態與經過20公里單模光纖傳輸。在考慮EA調變之啾頻現象後，RF衰減現象會增強。因為此衰減在高頻會較嚴重，為了補償衰減之能量損失，我們在高頻子載波給予外加能量。因此可以得到較好的訊號雜訊比，如同圖七(a)之藍色線所示。然而，在經過20公里單模光纖傳輸後，因為RF衰減效應，高頻子載波仍遭受較多與顯示較低之訊號雜訊比。在圖七(b)，我們繪出光纖傳輸前後之通道1 (128-QAM)與通道2 (64-QAM)之星座圖。圖八則顯示出DFB與EAM在直接互連、5公里與20公里單磨光纖傳輸之位元錯誤率。在低於 10^{-3} 之位元錯誤率，

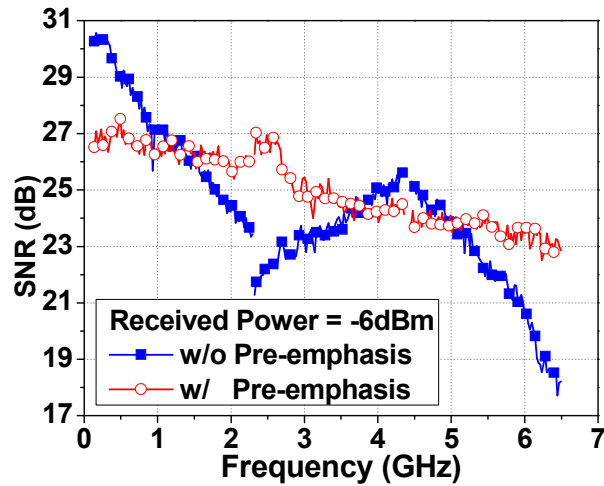


圖五、含頻譜展示之實驗設置架構圖。(a) 通道 2；(b) 通道 1；
(c) 通道 1 經過移頻轉換後；以及(d) 結合通道 1 與通道 2。

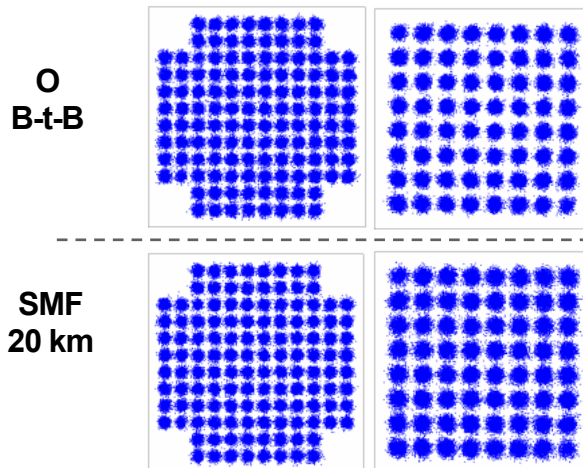
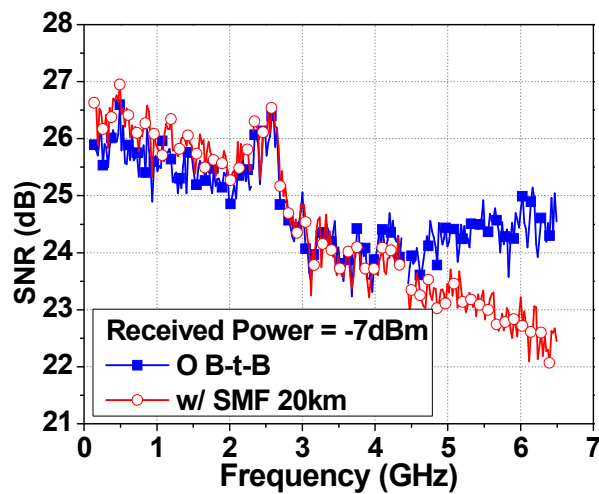
其接收能量為 -8.3 dBm與 -7.8 dBm。更且藉由預加重演算法，我們在DFB與EAM之下觀察到可忽略之傳輸害處。

3. 多重存取控制技術

除了都會環狀網路架構設計，我們亦針對OFDMA傳輸之特性以及此環狀網



圖六、預加重之前後子載波訊號雜訊比。



圖七、光纖傳輸前後之 EAM 訊號雜訊比與星座圖。

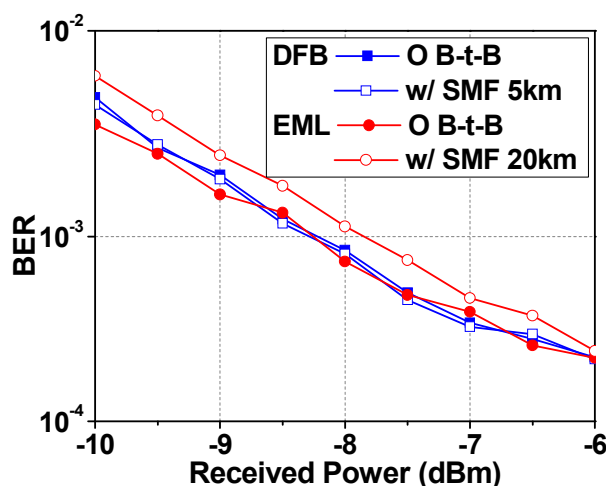
路之架構，設計適用之多重存取控制技術。在3.1章節，我們先簡略描述Quad-play之都會環狀網路架構與節點架構，並且提出新式OFDMA時槽控制架構。在3.2章節，我們描述此以類神經模糊理論為基礎之多重存取控制機制。為了驗證其效能，在3.3章節，我們透過網路模擬程式來觀察結果，並利用自我建構類神經推論網路來即時獲得最佳參數設定。

3.1、OFDMA/WDM 都會環狀網路架構

為了支援Quad-play整合型服務應用於都會環狀網路，我們在2.1章節提出了OFDM/WDM都會環狀網路架構，如圖一。為了達到高效率控制與多重存取，我們利用OFDM與WDM特性，將光波長與OFDM子通道作時槽切割，單位為frame。各節點利用frame為單位做接取式控制以控制頻寬。每個frame在頻域被切分為資料子通道與控制子通道，其中控制子通道包含所有子通道的配置映射圖。每個子通道在時域上也切分為數個OFDM symbols所組成的slot，以圖一為例，四個OFDM symbols構成一個slot，節點可依據需求，讀取控制子通道內容，並且將資料切分為好幾個slots放置於資料通道中，亦即，節點可同時存取多個slots資料，達到細緻的頻寬利用。因此，在考量OFDMA/WDM特性情況下，我們須設計多重存取控制系統，使得各節點可以公平配置頻寬。

3.2、多重存取控制系統

在此架構底下，由於所有節點共用同一條通道，因此上游節點也許會擷取所有的可用頻寬，使得下游節點無法競爭存取這條通道。為了解決傳輸公平性問題，需要藉由存取控制機制來限制上游節點的傳輸，方能維持足夠的剩餘頻寬給下游節點使用[13]。而在存取控制技術上，又分為兩種類型，分別為預防式控制與回饋式控制。若是上游節點無法即時得知下游傳輸狀態，則必須採用預防式控制，根據預先設定控制參數，使上游節點之剩餘頻寬可以受到控制。若是上游節點需要下游節點資訊來控制自己本身的輸出，則屬於回饋式控制。一般而言，由



圖八、光纖傳輸前後之 EAM/DFB 位元錯誤率。

於回饋式控制可以得到較充足資訊，因此對於頻寬利用率較高。然而，由於在都會環狀網路各節點的距離較遠，若採用回饋式控制機制，則會受到傳遞距離的影響反應時間較久。且全光網路頻寬過大，在暫存器數量不高情況下，上游節點反應時間差，無法即時性的讓下游節點迅速紓解本身的壅塞狀況。因此我們提出的方法為以預防式控制為主的機制。

在每個節點，多重存取控制系統(MAC)藉由每個節點內部產生的permit來調節自身節點在每個frame time內的slot傳輸。這permit定期由設置給此節點之固定速率(permit rate; PR)產生，並且儲存在節點內部虛擬之permit queue。此Permit queue size (PQS)有容量限制，若是已滿，則新的permit將被扔棄。在一個frame time裡，若至少有 p permits以及 p 可用slots，則此節點可以傳送 p slots至網路。在傳送 p slots資料之後，則 p permits也會由queue內移除。我們的permit-based MAC縱看之下雷同於寬頻非同步傳輸模式網路(ATM)之token-bucket訊務調節機制。然而，在ATM網路其token-bucket運作於不同節點，而其控制方式是彼此互相獨立的。相對而言，我們的permit-based MAC在設定各PR與PQS值給節點時，會直接影響所有下游節點的輸出流量與延遲表現，因此這項挑戰在於所有節點的(PR, PQS)之聯合設定以達到公平與高輸出之頻寬分配。

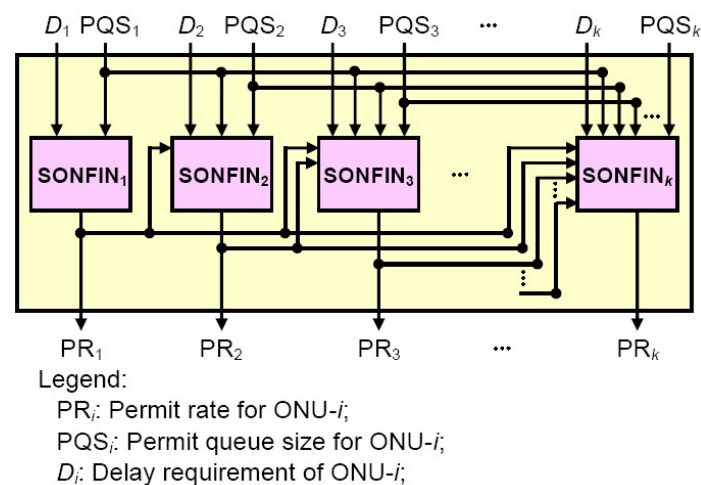
為了達到此目的，此MAC機制採用類神經模糊(neural-fuzzy)系統來實現。類神經模糊演算法已經被廣泛用來解決應用於複雜實際系統之非線性反函數問題[14]，這些問題無法藉由精確的數學理論模型來完成。這方法兼具類神經網路學習(neural-network's learning)與模糊系統推論(fuzzy-system's reasoning)之優勢，藉由線上(On-line)或離線(Off-line)訓練，此類神經模糊法透過調整內部模糊規則結構與參數，獲取系統輸入輸出參數之關係。在數種類神經模糊提案中，自我建構類神經推論網路(SONFIN)[14]展現了高度能力去改變系統狀態，因此在我們的設計裡採用了SONFIN架構。

如同先前所描述的，一個節點的平均延遲(D)僅與其PR, PQS設定以及所有在前的節點之PRs, PQSs有關。因此若先固定單一PQS值給所有節點，決定其PR值去符合延遲要求就成為一個非線性之反函數問題。假設網路共有 N 節點，依據上下游之順序編號為1到 N ，則節點 k 之MAC系統如同圖九所示，由 k 個SONFINs串連建構，分別對應到前 $k-1$ 節點以及節點 k 。在離線訓練程序，我們藉由網路模擬程式蒐集具代表性的訓練資料。而線上操作上，在每一次的系統起始時，給一組目標延遲值， D ，對 i 由1到 k ，設定 $D_i=D$ ，以及各節點相同的PR，SONFIN可以得到 PQS_k 值給節點 k 使用。同理，我們亦可以將目標延遲值 D 與固定PQS值，經由SONFIN得到 PR_k 值給節點 k 使用。

3.3、模擬程式結果

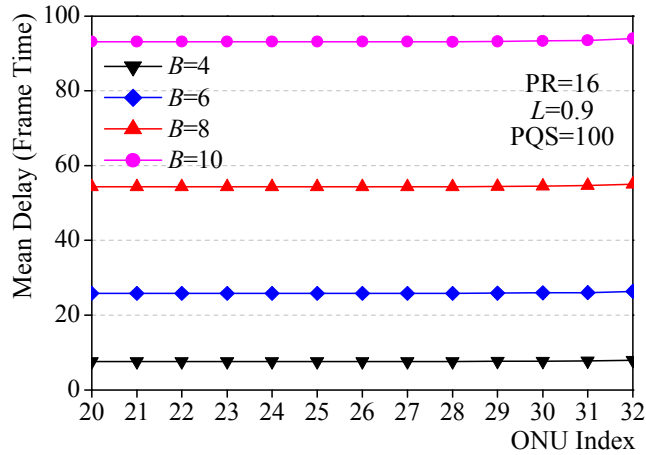
根據類神經模糊多重存取控制系統架構，我們藉由模擬程式來完成節點平均延遲以及延遲公平性表現。在這模擬程式設定裡，共有32個節點連成一個排狀雙環結構，雙環分別代表兩個傳輸方向，由於是對稱性結構，因此我們只觀察單一方向結果即可。此32節點共用資料通道，其由512 OFDM資料子通道構成。每個節點的資料產生程序皆為相同設定，並且具有自然凸波現象。訊務凸波(B)定義為資料產生峰值速率與平均速率之比值。在給定一個正規化的系統負載(L)情況下，每個節點產生一個凸波訊務，具有平均資料產生率 $(512/32)*L$ ，且依據雙重狀態離散時間中斷式波松程序(IPP)。IPP在每個frame時交替在高訊務流與低訊務流狀態。給定一個凸波值 B ，IPP可由四個參數來描述：高至低狀態轉換機率($=0.25$)；低至高狀態轉換機率($=0.01$)；高訊務流狀態速率($=B*L$)；以及低訊務流狀態速率($=L*(1-(0.01/0.25)*(B-1))$)。在每個frame時間會產生的資料量會依循著其高低訊務流狀態速率之Poisson分布來決定。我們使用了四組不同的訊務凸波設定，分別為 $B=4, 6, 8, 10$ ，在高系統負載($L=0.9$)狀態下。網路模擬結果可見圖十、圖十一。

我們首先看PQS對平均延遲的影響，計算單位是frame time，以及延遲公平性表現。32節點及512 subchannels，故每個節點可得PR值為16。如同圖十(a)之結果，我們觀察到延遲公平性在較小的PQS設定($=100$)之下可以達到優越的表現，但會導致偏高的延遲。我們檢查了平均延遲為PQS的函數，如同圖十(b)所示，平均延遲會隨著PQS值的增加而大大的遞減，而訊務凸波愈高情況下，對於延遲的改善愈明顯。圖十(b)的結果在給定訊務凸波與滿足一個延遲要求情況下，提供了有用的準則來決定PQS值。然而，如圖十(c)可得知，提高PQS設定值到3000可以有效的減輕延遲，代價卻是延遲表現上的不公平現象。越是處在下游節點，其傳送延遲會越糟。這問題在訊務凸波愈高之情況下，會更凸顯。也因此若要在所有節點共用相同PQS與PR設定情況下，平均延遲與延遲公平性表現將會是一個有得有失的問題。

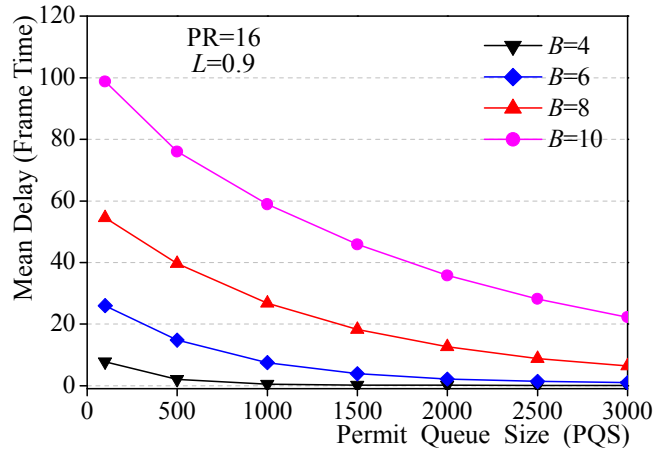


圖九、節點 k 之類神經模糊 MAC 系統。

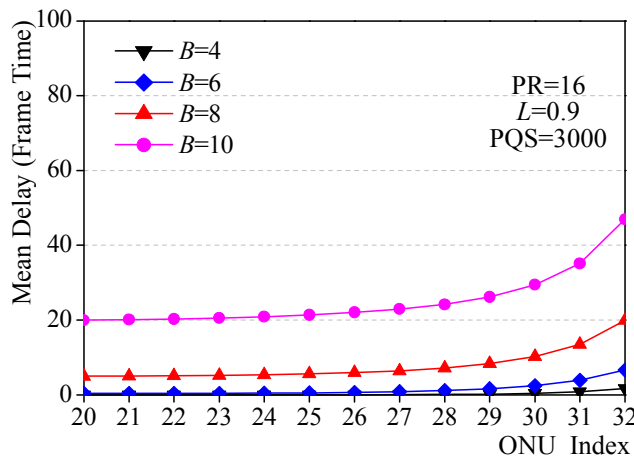
因此我們試圖分配不同的PQS與PR值給所有節點來達到延遲公平性。我們首先固定PR值並且利用類神經模糊MAC系統可獲得相異PQS值給不同節點。分別考慮延遲要求為5, 10, 20, 30, 與40 frame time情況下。由圖十一(a)可得知延遲公平性在較寬鬆的延遲要求下(20, 30, 40 frame times)可以找到適當的PQS設定滿足要求。然而在延遲要求較為拘謹情況下，譬如5或10，則下游節點增加PQS值已



(a) PQS 對平均延遲與公平性之影響



(b) 設定 PR 予不同節點達到相同延遲



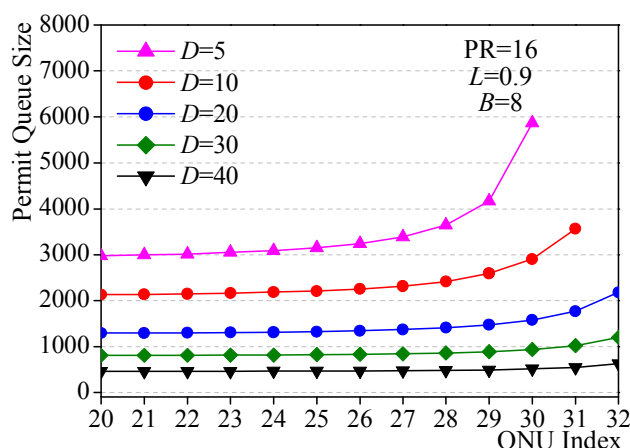
(c) PQS 對平均延遲與公平性之影響

圖十、平均延遲與延遲公平性表現。

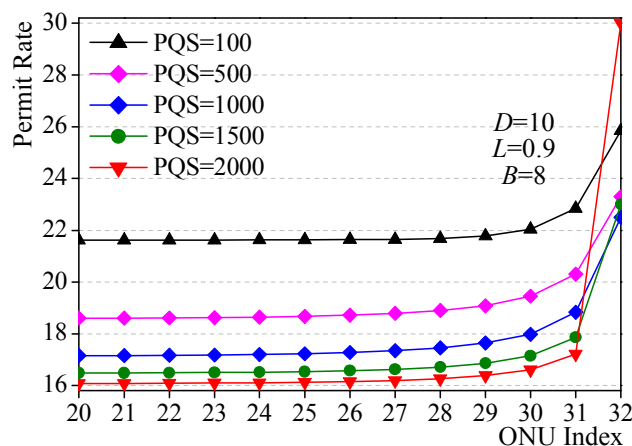
不能改善其延遲狀況，因此無法得到適當參數值。歸究其原因為上游節點之PQS過高，使得其優先佔用頻寬狀況下，較容易長期佔用資源，下游節點則無法及時獲得頻寬資源。因此，我們轉而採用較低的共用PQS設定限制上游節點佔用頻寬之情形，但是採取不同PR值設定給不同節點，愈下游節點則配置愈高的PR值。如圖十一(b)所示，在固定PQS設定情況下，藉由類神經模糊MAC系統獲得不同的PR設定給不同節點，我們可以找到適當的參數設定滿足延遲要求10，達到更優越的延遲公平性表現。

4. 自我評量

在本計畫的三年期報告中，我們首先提出新式OFDMA/WDM環狀網路架構與節點架構，並發展無線RF訊號與OFDMA訊號在OFDMA都會環狀網路疊合傳輸技術，最後實作出四個節點的離形網路以驗證可行性。此部份研究成果，已經於2009年發表(oral presentation)於世界最大的光通訊研討會 *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC)*。而在考量經濟效益情況下，我們採用10 GHz之光元件設備EAM/DML來實作40 Gb/s資料傳輸率之技術，此部份



(a) 設定 PQS 予不同節點達到相同延遲



(b) 設定 PR 予不同節點達到相同延遲

圖十一、類神經模糊 MAC 系統計算參數。

之完整研究成果已刊登於A級光學期刊*IEEE Photonics Technology Letters*。

依據此OFDMA/WDM環狀網路架構與節點架構，我們亦設計出其時槽控制架構與多重存取控制系統，此控制系統藉由自我建構類神經推論網路來實現，可以動態性與公平性的即時性進行頻寬分配，並且透過網路模擬程式來驗證。初步之研究成果，已經接受刊登於*IEEE*的A級期刊*Journal of Lightwave Technology*。

1. Maria C. Yuang, etc “A High- Performance OFDMA PON System Architecture and Medium Access Control,” to appear in *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2012.
2. H. Chen, C. Wei, D. Hsu, Maria C. Yuang, J. Chen, Yu-Min Lin, Po-Lung Tien, Steven S. W. Lee, S. Lin, W. Li, C. Hsu, and J. Shih, “A 40-Gb/s OFDM PON System Based on 10-GHz EAM and 10-GHz Direct-Detection PIN,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 1, Jan. 2012, pp. 85-87, EI., SCI.
3. D. Z. Hsu, C. C. Wei, H. Y. Chen, J. Chen, Maria C. Yuang, S. H. Lin, and W. Y. Li, “21 Gb/s After 100 km OFDM Long-Reach PON Transmission Using a Cost-Effective Electro-Absorption Modulator,” *OSA Optics Express*, vol. 18, no. 26, Dec. 2010, pp. 27758-27763, EI., SCI.
4. Maria Yuang, P. Tien, D. Hsu, C. Wei, H. Chen, J. Chen, and J. Shih, “A Virtual-Tree OFDMA PON System Architecture,” *IEEE ICC*, 2012.

此外，本計畫主持人於2010年度亦擔任lead Guest Editor for *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)* special issue on “Next-Generation Broadband Optical Access Network Technologies,” 在此特刊內，OFDMA技術是其中一項焦點議題，對於未來全球通訊之發展具有極高之影響力。

參考文獻

- [1] B. Mukherjee, “WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, no. 10, Oct. 2000, pp. 1810-1824.
- [2] S. Yao, S. Yoo, B. Mukherjee, and S. Dixit, “All-Optical Packet Switching for Metropolitan Area Networks: Opportunities and Challenges,” *IEEE Comm. Mag.*, vol. 39, no. 3, Mar. 2001, pp. 142-148.
- [3] L. Xu, H. Perros, and G. Rouskas, “Techniques for Optical Packet Switching and Optical Burst Switching,” *IEEE Comm. Mag.*, vol. 39, no. 1, Jan. 2001, pp. 136-142.
- [4] M. Yuang, S. Lee, P. Tien, Y. Lin, J. Shih, F. Tsai, and A. Chen, “Optical Coarse Packet-Switched IP-over-WDM Network (OPSINET): Technologies and Experiments,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 24, no. 8, Aug. 2006, pp. 117-127.

- [5] C. Develder, J. Cheyuns, E. Van Breusegem, E. Baert, D. Colle, M. Pickavet, and P. Demeester, "Architectures for optical packet and burst switches," (INVITED) *Proc. of ECOC*, vol. 1, Rimini, Italy, Sept. 21-25, 2003, pp.100-103.
- [6] Y. M. Lin, "Demonstration and design of high spectral efficiency 4Gb/s OFDM system in Passive Optical Networks," *Proc. of OFC*, 2007.
- [7] D. Qian, J. Hu, P. Ji, T. Wang, and M. Cvijetic, "10-Gb/s OFDMA-PON for Delivery of Heterogeneous Services," *OFC*, 2008.
- [8] M. Bakaul, A. Nirmalathas, C. Lim, D. Novak, and R. Waterhouse, "Hybrid Multiplexing of Multiband Optical Access Technologies Towards an Integrated DWDM Network," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 21, Nov. 2006, pp. 2311-2313.
- [9] M. Crisp, S. Li, A. Watts, R. Penty, and I. White, "Uplink and Downlink Coverage Improvements of 802.11g Signals Using a Distributed Antenna Network," *IEEE J. of Lightw. Technol.*, vol. 25, no. 11, Nov. 2007, pp. 3388-3395.
- [10] J. L. Wei, X. Q. Jin, and J. M. Tang, "The Influence of Directly Modulated DFB Lasers on the Transmission Performance of Carrier-Suppressed Single-Sideband Optical OFDM Signals over IMDD SMF Systems," *J. Lightw. Technol.*, vol. 27, no.13, July 2009, pp. 2412-2419.
- [11] C. C. Wei, "Small-signal Analysis of OOFDM Signal transmission with Directly Modulated Laser and Direct Detection," *OSA Optics Letters*, vol. 36, no. 2, Jan. 2011, pp. 151-153.
- [12] F. Devaux, Y. Sorel, and J. F. Kerdiles, "Simple Measurement of Fiber Dispersion of Chirp Parameter of Intensity Modulated Light Emitter," *J. Lightw. Technol.*, vol. 11, no. 12, Dec. 1993, pp. 1937-1940.
- [13] N. Bouabdallah, A. Beylot, E. Dotaro, and G. Pujolle, "Resolving the Fairness Issues in Bus-Based Optical Access Networks," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 23, no. 8, Aug. 2005, pp. 1444-1457.
- [14] C. Juang and C. Lin, "An On-Line Self-Constructing Neural Fuzzy Inference Network and Its Applications," *IEEE T. Fuzzy Systems*, vol. 6, no. 1, Feb. 1998, pp. 12-32.